

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INJEÇÃO DE GROUT RECORRENDO AO ENSAIO DE ULTRA-SONS E TOMOGRAFIA ULTRA-SÓNICA

Fernando Jorne^{1*}, Fernando M.A. Henriques² e Luís G. Baltazar²

1: Centro de Investigação em Estruturas e Construção - UNIC
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica
e-mail: fjorne@fct.unl.pt, web: <http://www.fct.unl.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica
e-mail: {fh,luis.baltazar}@fct.unl.pt web: <http://www.fct.unl.pt>

Palavras-chave: Alvenarias antigas de pedra, Meio poroso, Injecção de grout, Cal hidráulica, Ensaio de ultra-sons, Tomografia ultra-sónica

Resumo. *As intervenções para a reabilitação e conservação de alvenarias antigas envolvem frequentemente acções de consolidação destinadas a melhorar o comportamento estrutural, nomeadamente as resistências ao corte, à flexão e à compressão. Uma das técnicas de consolidação mais utilizadas consiste na injeção de grouts (caldas) no interior das alvenarias (meio poroso estudado), permitindo a criação de ligações entre os elementos da alvenaria e aumentar a sua homogeneidade através do preenchimento dos vazios existentes no núcleo da alvenaria. O processo de injeção apenas será bem sucedido se for assegurado um adequado escoamento do grout no meio poroso. O fluxo do grout além de depender das propriedades do grout no estado fresco (tais como a estabilidade e o comportamento reológico), depende também da estrutura interna do meio poroso, daí a necessidade de uma caracterização ao nível da distribuição de tamanho de partículas, volume de vazios e permeabilidade. A falta de informação sobre o desempenho de grouts de cal hidráulica em função do meio poroso a ser injectado, aumenta a importância de uma investigação detalhada sobre este assunto.*

A fim de testar a eficácia do processo de injeção e a ligação do grout com os materiais do meio poroso, foram realizados ensaios de ultra-sons, que serviram para aferir a qualidade de injeção do grout ao longo da altura de injeção, bem como de input para a obtenção de imagens de tomografia (mapas de distribuição de velocidades de ultra-sons), recorrendo ao programa 3DTOM.

A partir dos resultados obtidos na campanha experimental, pode-se inferir que as velocidades de ultra-sons podem ser utilizadas com sucesso para qualificar a qualidade de injeção de um meio poroso. Semelhante conclusão foi obtida em relação à tomografia ultra-sónica. De facto, os resultados obtidos estão de acordo com as inspecções visuais, sendo possível localizar as áreas não injectadas no interior do meio poroso após o processo de cura. Assim, conclui-se que a combinação das técnicas de ultra-sons e tomografia, pode ser aplicada de uma forma bastante útil no controlo da eficácia da técnica de injeção de grout, isto é, no controlo da penetração do grout no interior do meio poroso, influenciando o valor da compacidade do meio poroso.

Este trabalho insere-se no âmbito de um projecto de investigação mais vasto que visa contribuir para o aumento de conhecimento da comunidade científica e da indústria sobre a técnica de injeção de grout.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de injeção de *grout* tem sido considerada como uma técnica adequada para restabelecer a homogeneidade, uniformidade de tensões e a continuidade dos panos de alvenaria antiga (meio poroso estudado). Diversas investigações realizadas nas últimas duas décadas comprovam a eficácia desta técnica [3][4][13].

Em geral, os objectivos desta técnica são: (i) preencher os vazios e as fendas aumentando desta forma a compacidade da alvenaria e consequentemente a sua resistência, (ii) criar ligação entre dois ou mais panos de uma alvenaria, que é fundamental no caso de as ligações transversais entre os panos estarem defeituosas. Assim, com o intuito de avaliar a penetrabilidade do *grout* no interior do meio poroso, à semelhança de anteriores investigações de outros autores [5][13], fizeram-se alguns ensaios de injectabilidade através da criação de modelos que reproduzissem fielmente as alvenarias antigas com diferentes estruturas internas.

Para avaliar a qualidade da injeção do *grout* e aferir qual o efeito na compacidade do meio poroso injectado, foram realizados os ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica [15]. A combinação destas técnicas pode ser aplicada de uma forma bastante útil na detecção da morfologia interna dos elementos estruturais criados, fornecendo uma informação qualitativa e quantitativa sobre a sua compacidade [9]. Assim, facilmente podem ser detectadas áreas de injeção onde o *grout* tem mais dificuldade em penetrar. De salientar que numa injeção de *grout*, quando existe um bom preenchimento e uma boa ligação do *grout* com os materiais da parede, o risco de falta de monolitismo estrutural é mitigado. Deste modo, reduz-se o risco de colapso frágil, que é frequentemente caracterizado pelo destacamento dos panos exteriores para fora do seu plano.

2. MATERIAIS ESTUDADOS

2.1. Grout

A formulação do *grout* utilizado nos ensaios de injeção está presente na Tabela 1. O ligante usado foi a cal hidráulica NHL5 produzida pela Secil-Martingança. A escolha por este ligante deveu-se à maior compatibilidade mecânica, física e química que este apresenta com os materiais originais das alvenarias históricas antigas comparativamente ao cimento. O uso de superplastificante (SP) permitiu melhorar as propriedades reológicas do *grout* [14]. Assim sendo, não foi necessário usar uma dosagem água/ligante (A/L) elevada (que poderia provocar instabilidade da mistura) de forma a obter um *grout* cuja fluidez assegure uma boa injectabilidade. O procedimento de amassadura escolhido foi de acordo com trabalhos anteriores de investigação de Baltazar *et al* [2], aquele que dava origem a um *grout* com melhor desempenho em termos reológicos, estabilidade e retenção de água.

Tabela 1. Composição do *grout* usado nas injeções

Ligante	A/L	SP	% SP
NHL5	0,5	Glenium Sky 617 (BASF)	1.2

2.2. Meios porosos usados nos ensaios de injeção

A fim de estudar a penetrabilidade dos *grouts*, diversos ensaios de injectabilidade foram feitos. Uma vez que é difícil reproduzir uma alvenaria real e visualizar o interior de uma injeção [1][3], foram então criados modelos que simulassem as alvenarias históricas de pedra através da combinação de três diferentes tamanhos de pedra calcária (vulgarmente designada por areia britada e brita, consoante a dimensão do material) [vd.Figura 1]. Após a lavagem, secagem e peneiração de material, foram obtidos cinco meios porosos com diferentes distribuições de tamanho de partículas [vd.Tabela 2], com o intuito de simular alvenarias com diferentes permeabilidades e volumes de vazios.



Figura 1. Três intervalos diferentes de tamanho de partículas (fino, médio e grosso)

Tabela 2. Diferentes meios porosos estudados

Meio Poroso	Intervalos de tamanho de partículas		
	0.15mm - 2mm (fino)	2mm - 4.75mm (médio)	4.75mm - 9.5mm (grosso)
A	33,33%	33,33%	33,33%
B	33,33%	-	66,66%
C	16,66%	-	83,33
D	-	100%	-
E	-	50%	50%

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Ensaios de injeção

Com o objectivo de estudar a capacidade de injeção do *grout* no interior do meio poroso, alguns ensaios de injeção foram realizados, recorrendo a modelos simplificados (cilindros acrílicos com um diâmetro de 144mm e uma altura de 300mm). Estes foram preenchidos com um dos meios porosos presentes na Tabela 2, tentando reproduzir tanto quanto possível uma situação real *in situ*. O *setup* usado nos testes de injeção [vd.Figura 2] foi baseado em trabalhos anteriores de diversos autores [4][5][12].

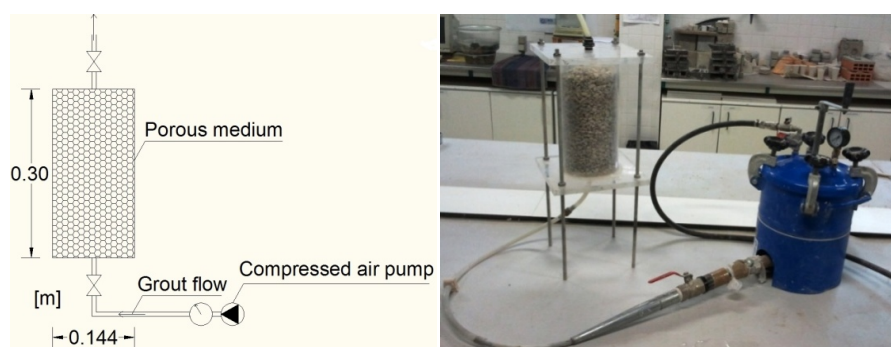


Figura 2. Setup para testes de injeção realizados em laboratório

3.2. Ensaios de caracterização da injeção

A caracterização da injeção dos meios porosos injectados (cilindros) foi feita aos 45 dias. No processo de cura os cilindros foram mantidos em condições de laboratório ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $H.R.=65\%$). Numa primeira fase, após a desmoldagem dos cilindros, foi realizada a tomografia ultra-sónica. Posteriormente, os cilindros foram cortados em 3 "fatias", sendo realizado em cada uma o ensaio de ultra-sons.

3.2.1. Ensaio de velocidade de ultra-sons

O ensaio de ultra-sons consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultra-sónico, entre dois pontos, tendo em vista a obtenção de informação sobre as características dos elementos ensaiados [8]. Trata-se de um ensaio bastante expedito e eficiente, pois permite avaliar as características dos materiais de uma forma não-destrutiva.

O ensaio de ultra-sons baseia-se no princípio da propagação das ondas elásticas, segundo o qual a sua velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do meio. A velocidade de propagação é tanto maior quanto mais denso for o material, uma vez que a onda se propaga por vibração das partículas sólidas que o constituem. Assim, é possível detectar alterações significativas nas características dos materiais ensaiados, através da variação da velocidade de transmissão.

No ensaio, é geralmente utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), que permite um impulso eléctrico de baixa frequência ultra-sónica. Os transdutores de frequências entre os 40 e 60KHz são aqueles que tem mais aplicações, no presente trabalho foi utilizado um de 54KHz. Os testes foram conduzidos directamente sobre as amostras, localizando os transdutores (transmissor e o receptor) em lados opostos nos cilindros ensaiados [vd.Figura 3].

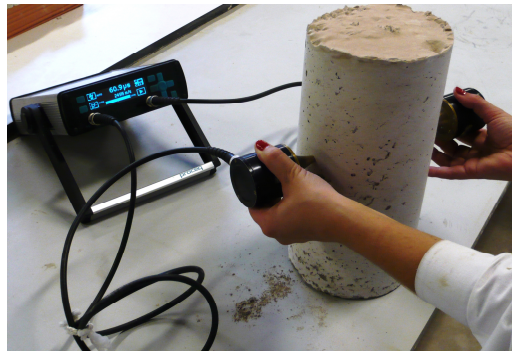


Figura 3. Ensaio de ultra-sons realizado com um equipamento PUNDIT

A elaboração de dados consistiu na medição de tempos (T em s) que o impulso gerado leva a percorrer a distância (L em m) entre o transmissor e o receptor. Portanto, a velocidade de ultra-sons é calculada da seguinte forma:

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

No presente trabalho as medições foram feitas em três diferentes alturas, mais concretamente para cada uma das três "fatias" cortadas, segundo a malha apresentada na Figura 4. O uso deste ensaio de ultra-sons tem como objectivo controlar a eficácia de injeção (isto é, a penetração e a difusão de *grout*) através da avaliação da densidade a diferentes alturas [15].

Atendendo a que o grau de saturação numa amostra pode afectar o valor da velocidade de ultra-sons [6], todas as amostras foram secas antes de serem testadas.

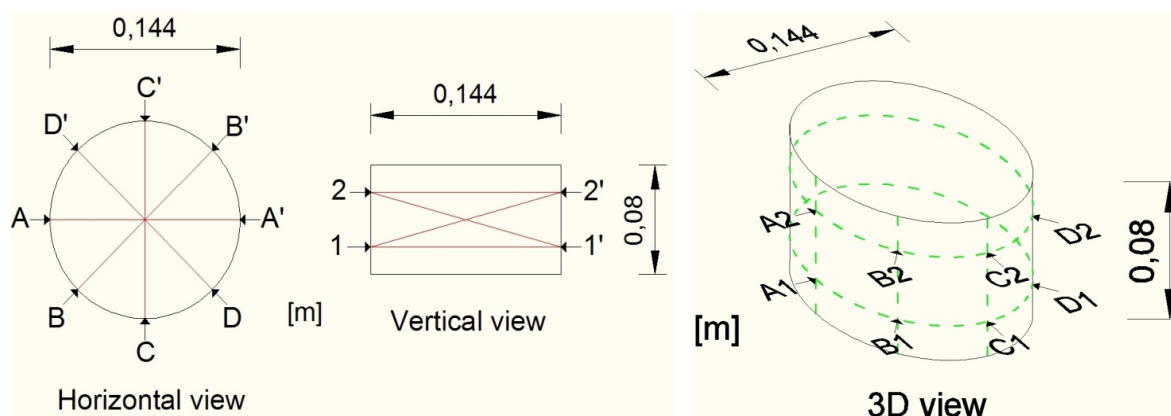


Figura 4. Esquema da grelha de pontos usada no ensaio de ultra-sons em cada uma das fatias obtidas após o corte do cilindro

3.2.2. Tomografia ultra-sónica

As imagens tomográficas são obtidas através de uma técnica computacional 3DTOM que utiliza um método iterativo de forma a processar uma grande quantidade de dados (as velocidades ultra-sónicas medidas em cada posição da malha) obtidos na superfície externa do corpo estudado [7]. A partir das leituras do ensaio ultra-sons, o 3DTOM permite criar um mapa de distribuição de velocidades, fornecendo uma "imagem" do interior do cilindro [15], permitindo desta maneira a avaliação da eficácia da técnica de injeção de *grout* nos modelos injectados [10].

Cada um dos cilindros analisados foi marcado por uma grelha de pontos [vd.Figura 5], cujo refinamento da malha está relacionado com a resolução esperada para as imagens tomográficas horizontais fornecidas como *output* pelo software 3DTOM para diferentes alturas (fez-se uma secção de corte segundo um plano horizontal, conforme exibido na Figura 5-dir.). Desta forma, foi possível identificar a área e a localização de vazios ao longo da altura de injeção.

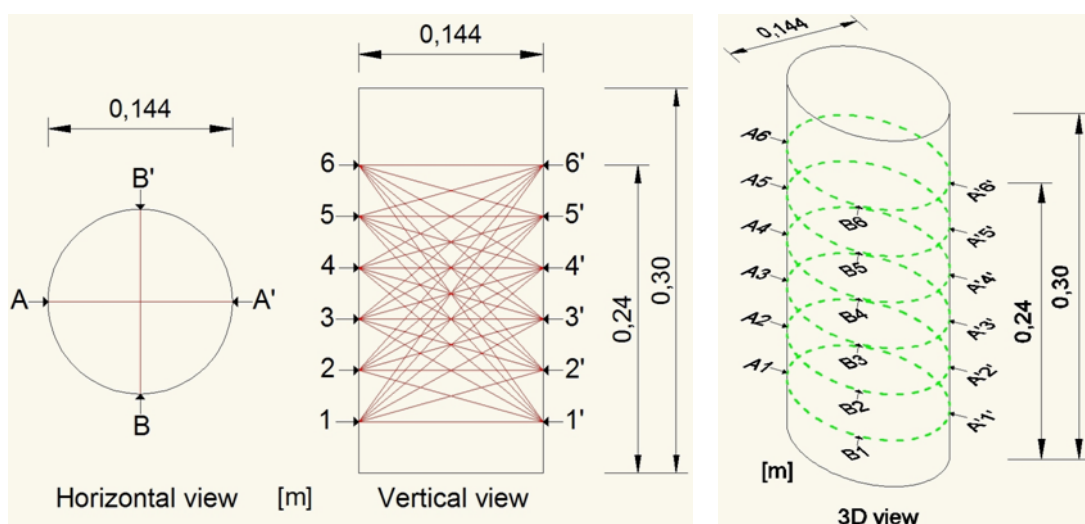


Figura 5. Esquema da grelha de pontos usada na tomografia ultra-sónica com o cilindro inteiro

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Inspeções visuais durante a injeção dos modelos cilíndricos

Durante os ensaios de injeção foi feito um vídeo que permitiu posteriormente analisar a penetração do *grout* dentro do meio poroso. Nos cilindros com meios porosos A e B a injeção não foi bem sucedida, não havendo penetração e difusão do *grout* até ao topo do cilindro. A razão prende-se com a presença elevada de partículas finas (33% em massa) [vd.Tabela 2], que além de terem uma enorme capacidade de absorção de água (afectando as propriedades reológicas do *grout*), por vezes, formam uma camada ao longo da secção do cilindro provocando a interrupção do fluxo. A partir destes ensaios, também foi possível observar que o pré-humedecimento do meio poroso não consegue resolver o assunto da penetrabilidade [vd.Tabela 3]. Com a agravante de a resistência mecânica destas amostras ser bastante inferior, porque deixa de haver absorção de *grout* no interior dos poros capilares mais finos. Assim sendo, o pré-humedecimento deve ser usado com muita precaução [12].

Tabela 3. Qualidade da técnica de injeção de *grout* para os diferentes meios porosos estudados

Meio Poroso	Pedra calcária	
	Seco	Molhado
A	fraca	fraca
B	razoável	razoável
C	boa	boa
D	muito boa	muito boa
E	muito boa	muito boa

4.2. Ensaio de velocidade de ultra-sons

A partir da Tabela 4 é possível observar a variação da velocidade de ultra-sons em função da altura de injeção, isto é, existe um gradiente de velocidades dependendo da altura de injeção. Atendendo a que existe uma relação entre velocidade de ultra-sons com a densidade do meio [8], pode-se afirmar que existe um gradiente de densidades que é negativo no caso de injeções com o meio poroso molhado e positivo quando o meio poroso se encontra seco aquando da injeção. No caso dos meios porosos secos, o *grout* ao penetrar ao longo do meio poroso, o seu rácio A/L vai diminuindo, pois parte da sua água vai sendo absorvida pelas partículas presentes no meio poroso, originando um aumento da densidade do *grout*. Semelhantes resultados foram alcançados por Van Rickstal [13].

De uma maneira geral, os cilindros em que o meio poroso foi humedecido previamente, como já foi referido no subcapítulo 4.1, tiveram uma melhor qualidade de injeção. Além disso, verificou-se uma injeção mais homogénea comparativamente aos cilindros em que não houve pré-humedecimento do meio poroso. No entanto, verifica-se que em todos os cilindros, a velocidade média de ultra-sons é maior nos meios porosos sem pré-humedecimento [vd.Tabela 4], devido à menor presença de vazios após o processo de cura. A razão para tal, prende-se pelo facto de ao injectar-se previamente com água, esta é absorvida pelos poros (sobretudo pelos de menor dimensão, onde a pressão capilar é maior), que ao ficarem preenchidos com água impedem na fase de injeção do *grout* a entrada do mesmo. Durante o processo de cura, a água absorvida será evaporada, deixando espaços vazios, contribuindo para uma diminuição da compacidade/densidade do cilindro, atenuando desta forma a propagação das ondas ultra-sónicas.

Tabela 4. Distribuição vertical de velocidades ultra-sónicas (m/s) medidas em diferentes alturas dos cilindros (base, meio e topo)

		Velocidade Ultra-sónica (m/s)			
		Localização da altura do cilindro			
Meio Poroso		Base	Meio	Topo	Média
C	<i>Seco</i>	2250	2516	2488	2418
	<i>Molhado</i>	1700	1631	1592	1641
D	<i>Seco</i>	1984	2040	2198	2074
	<i>Molhado</i>	2020	1914	1811	1915
E	<i>Seco</i>	2350	2508	2470	2443
	<i>Molhado</i>	2246	2172	2107	2175

A velocidade de propagação não se mantém constante em função da distância entre transdutores. Esta situação apenas ocorreria caso os meios porosos injectados resultassem num material homogéneo, o que não corresponde minimamente à realidade. A Figura 6 indica que há uma tendência generalizada para a diminuição gradual da velocidade de propagação à medida que a distância entre transdutores aumenta, sendo mais expressiva nos meios porosos onde a qualidade de injeção foi inferior, nomeadamente nos meios porosos "C".

O andamento das velocidades de propagação ao longo das medições parece também evidenciar que as medições com maior distância entre os transdutores, são mais representativas da estrutura interna do meio poroso injectado, o que pode ser justificável pelo facto de para maiores distâncias as ondas se propagam ao longo de uma maior altura do cilindro (e não apenas num plano horizontal), avaliando uma maior altura do meio poroso injectado na qual a existência de heterogeneidades/vazios se pode fazer sentir de uma forma mais assinalável. Porém, convém salientar que a fiabilidade das velocidades para maiores distâncias é bastante menor, uma vez que a intensidade do sinal de medição para estes casos diminuiu substancialmente. O resultado mais expressivo ocorre novamente nos meios porosos "C" devido à presença de partículas finas, o que dificulta a penetrabilidade do *grout*. De referir também que, no casos dos meios porosos "D" e "E", os coeficientes de variação obtidos nos valores de velocidade de ultra-sons são mais baixos do que se verificou no meio poroso "C" [vd. Figura 6], o que pode ser explicado por uma maior heterogeneidade da injeção deste último. Atendendo a que apresenta na sua composição partículas finas, o *grout* terá mais dificuldade em penetrar nos vazios, especialmente naqueles onde existam partículas finas na imediação. Outro aspecto a salientar da Figura 6, é o menor valor do coeficiente de variação presente nos meios porosos com pré-humedecimento, comprovando assim a maior homogeneidade da injeção de *grout* existente nestes meios porosos. De facto, as partículas do meio poroso ao estarem humedecidas, tem como consequência uma redução do seu poder de absorção, bem como da resistência à passagem fluxo de injeção, permitindo que o *grout* tenha mais fluidez e energia para penetrar nos vazios existentes no interior do meio poroso.

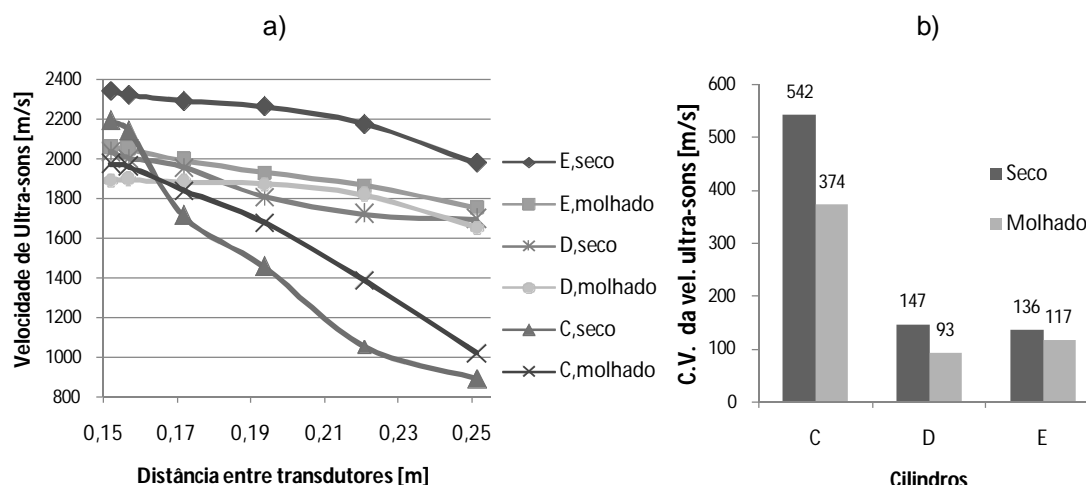


Figura 6. a) Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância de ultra-sons [m]; b) Coeficiente de variação das curvas de velocidades de ultra-sons

Aquando das injeções de *grouts*, consoante o tipo de meio poroso que se estava a injectar, o valor da massa de *grout* injectado variou. Através da Figura 7, pode-se observar uma razoável relação entre a quantidade de *grout* injectada e a velocidade média de ultra-sons que posteriormente é obtida em cada cilindro. De facto, é inequívoco que a maior presença de *grout* num meio poroso (isto é, a melhor qualidade de injeção), resulta em maiores valores de velocidades de ultra-sons, uma vez que após o processo de cura, a presença de vazios é menor.

De acordo com os resultados, é possível afirmar que os resultados obtidos pelo ensaio de ultra-sons podem ser utilizados para controlar a penetração e difusão do *grout* durante os ensaios de injeção em laboratório, contribuindo para uma melhoria da técnica de injeção.

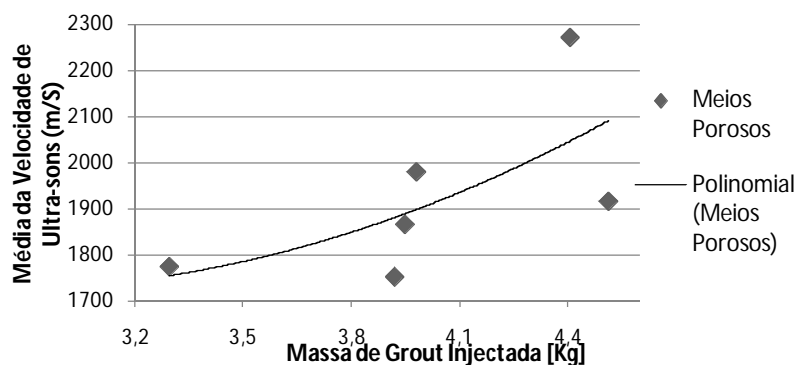


Figura 7. Massa de *grout* injectada [Kg] vs Velocidade de ultra-sons [m/s]

4.3. Imagens de tomografia ultra-sónica

Nesta secção serão analisados a distribuição de velocidades presentes nas imagens tomográficas e será feita uma comparação destas com o registo fotográfico realizado após o corte dos cilindros injectados, no qual resultaram as 3 "fatias": base, meio e topo. As distribuições de velocidades foram obtidas a partir do cálculo computacional dos valores de ultra-sons medidos segundo a malha definida [vd.Figura 5].

Ao analisarem-se as imagens tomográficas, os resultados de alguns cilindros preenchidos por meios

porosos com presença de material fino requerem uma análise mais detalhada. É o caso do cilindro "C,seco", com baixas velocidades em zonas onde antes da injeção estava presente material fino (através de registo fotográfico, observa-se que as zonas não penetradas pelo *grout* é devido à presença de material fino), resultando num estado heterogéneo após a injeção. Na Figura 8 são apresentadas duas imagens de tomografia horizontais alusivas ao cilindro "C,seco", onde é possível constatar o estado heterogéneo dada a variação de distribuição de velocidades obtida. A partir destas imagens, pode-se extrapolar que na fatia do meio a presença de vazios estaria mais concentrada no núcleo e na fatia do topo na zona inferior e da direita, atendendo aos menores valores de velocidade (1000-1700 m/s). A veracidade destes resultados é comprovada pelo registo fotográfico, conforme se pode observar nas imagens fotográficas presentes na Figura 8. Na verdade, nestas zonas de vazios há uma atenuação elevada da propagação das ondas ultra-sónicas, resultando em menores valores de velocidades nas imagens tomográficas.

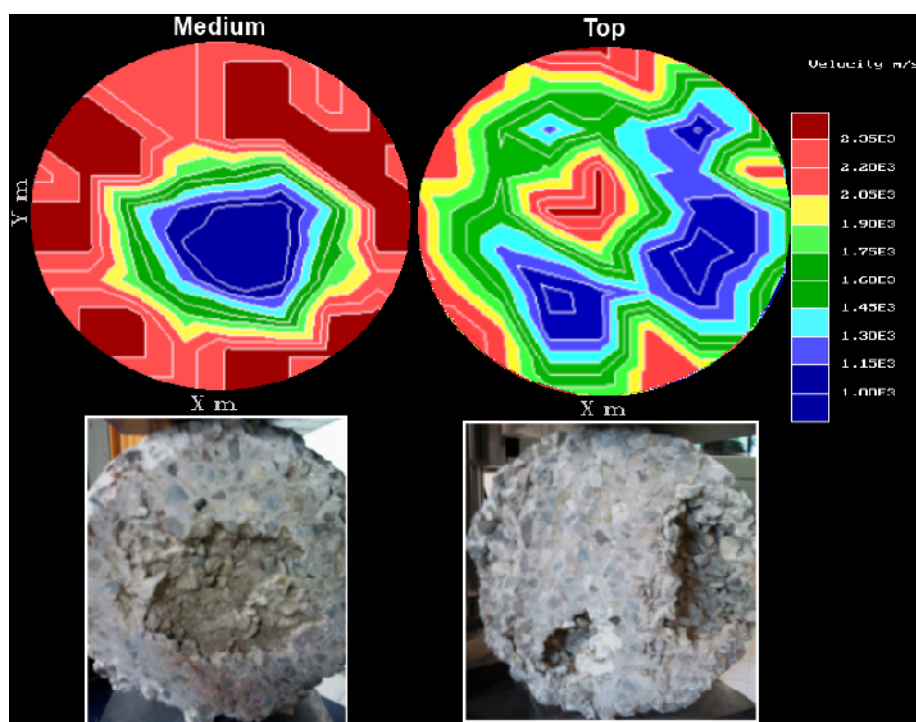


Figura 8. Resultados de tomografia horizontal ultra-sónica e inspecções visuais no cilindro "C,seco" nos níveis: meio e topo

As maiores velocidades de ultra-sons foram geralmente localizadas em meios porosos com porosidade mais elevada e ausência de partículas finas (antes da fase de injeção), que é o caso do meio poroso "E,seco". Os resultados mostram uma distribuição homogénea de velocidades [vd.Figura 9-dir.], o que parece indicar que a técnica de injeção de *grout* neste meio poroso foi eficaz. Comparado com os resultados do cilindro "C,seco" [vd.Figura 8], a variação da distribuição de velocidades é mais suave, sendo o intervalo de velocidades limitado ao intervalo de 2000-2400 m/s. Por conseguinte, ao contrário do cilindro "C,seco", o cilindro "E,seco" apresenta uma secção compacta caracterizada pela ausência de espaços vazios. Os resultados obtidos pela imagem de tomografia foram confirmados após o corte do cilindro, onde foi possível observar as partículas do meio poroso perfeitamente ligadas com o *grout* [vd.Figura 9].

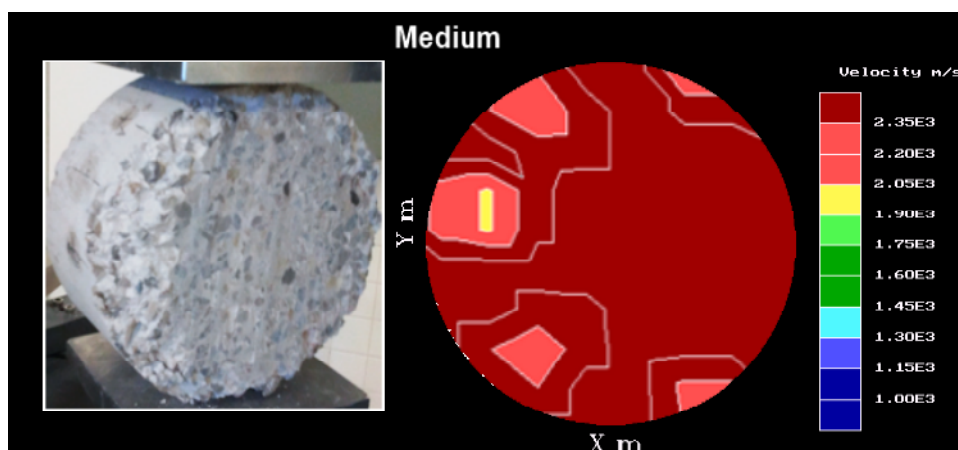


Figura 9. Resultados de tomografia horizontal e inspecções visuais no cilindro "E, seco" no nível meio

No que diz respeito aos cilindros "D", a comparação de imagens de tomografia para três níveis diferentes, é apresentada na Figura 10. Ao analisarem-se estas imagens, constata-se uma coerência com os resultados da distribuição vertical de velocidades ultra-sónicas apresentadas na Tabela 4. Quando o meio poroso está seco no momento da injeção, as velocidades mostram um aumento no sentido da zona superior do cilindro [vd. Figura 10-esq.]. De facto, a imagem tomográfica respeitante à zona da base foi caracterizada por menores valores de velocidade de ultra-sons comparativamente à imagem da zona do topo (valores médios de velocidade nas secções foram cerca de 1948 e 2088 m/s, respectivamente). No caso meio poroso humedecido, o inverso aconteceu. A diferença em altura ao nível da coesão do material injectado, que foi possível observar durante o corte do cilindro foi também detectada na comparação das imagens tomográficas. Enquanto que o valor médio das velocidades é de cerca de 2066 m/s para a secção da base, o valor médio respeitante à secção do topo diminui para cerca de 1866 m/s [vd. Figura 10-dir.]. A tomografia de imagens exibidas na Figura 10 mostram, em geral, que os valores baixos de velocidade ultra-sónica (cerca de 1700 m/s) permitem a definição de zonas de cilindros em que houve uma injeção de fraca qualidade.

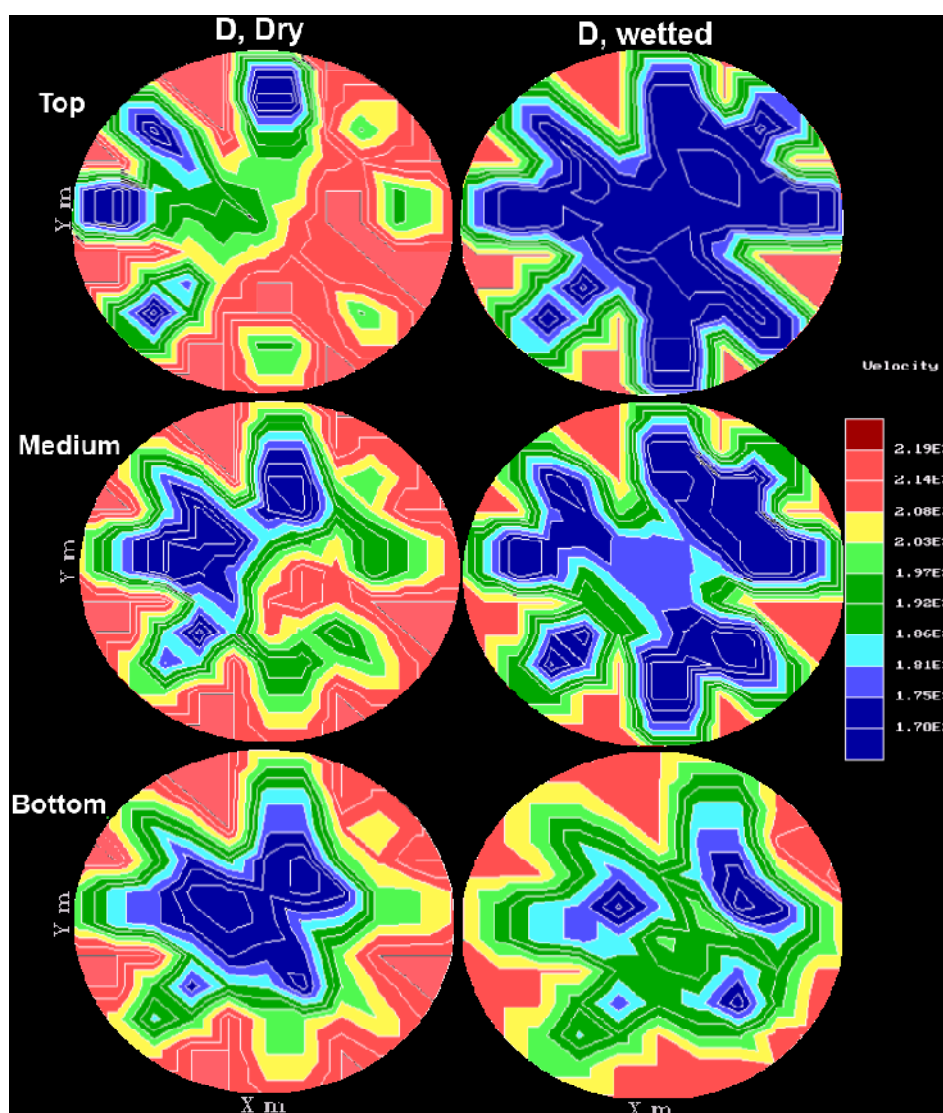


Figura 10. Resultados de tomografia horizontal ultra-sónica: "D,seco" (imagens da esquerda) e "D,molhado" (imagens da direita), nos níveis: base, meio e topo do cilindro

5. CONCLUSÕES

- Durante o ensaio de ultra-sons, foi possível constatar que existe para cada meio poroso injectado um gradiente de densidades ao longo da altura de injeção. Consoante o meio poroso esteja humedecido ou não aquando da injeção, o gradiente é negativo ou positivo, respectivamente. Outro facto verificado, é a menor velocidade média de ultra-sons nos meios porosos com pré-humedecimento, não obstante, de apresentarem um menor coeficiente de variação, resultado de uma injeção mais homogénea que existe nestes meios porosos. A partir da relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a distância entre transdutores, verificou-se que os meios porosos injectados estão longe de se assemelharem a um material homogéneo. Tal facto, é observado com clarividência nos meios porosos "C", devido à presença de partículas finas, nas quais o *grout* tem muita dificuldade em penetrar, resultando numa menor homogeneidade de injeção.

- Atendendo ao tipo de ensaio (ensaio não destrutivo, de fácil e rápida execução) e tendo em conta os resultados obtidos na campanha experimental, pode-se inferir que as velocidades de ultra-sons podem ser utilizadas com sucesso para qualificar a qualidade de injeção de uma alvenaria. No entanto, é essencial que durante o ensaio os operadores dêem especial atenção à calibração do aparelho, bem como a factores externos (como a limpeza dos transdutores, a temperatura e possíveis vibrações existentes na sala de ensaio) que podem adulterar os resultados.

- Em relação à tomografia ultra-sónica, os resultados estão de acordo com as inspecções visuais e conseguem localizar as áreas não injectadas no interior do meio poroso injectado. De facto, as zonas das imagens de tomografia com baixa velocidade correspondem às zonas com maior volume de vazios. Assim, confirmou-se que a tomografia ultra-sónica é uma ferramenta útil para controlar a eficácia da técnica de injeção de *grout*, isto é, a extensão e difusão da penetração do *grout*, que influencia a estrutura interna de um meio poroso injectado, nomeadamente ao nível da sua compacidade/densidade [11].

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projecto de investigação PTDC/ECM/104376/2008, fundada pela FCT/MCTES, Portugal. Os autores agradecem ao Eng.^o Vítor e à Eng.^a Ana Santos pela ajuda preciosa na execução dos ensaios e à Eng.^a Dina Frade (Secil-Martingança) pelo fornecimento da cal hidráulica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Almeida, C., et al., *Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls*. s.l.: Construction and Building Materials 30, 2012, pp.188-197, (2012).
- [2] Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A. e Jorne, F., *Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. s.l.: Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 838–845, Oct. 2012., (2012).
- [3] Binda, L. e Anzani, A., *Structural behaviour and durability of stone masonry, saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures*. s.l.: New York: Wiley, 1997: 112-48, (1997).
- [4] Binda, L., et al., *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the cathedral of Noto*. s.l.: Construction and Building Materials 17 (2003) pp.629-639, (2003).
- [5] Bras, Ana e Henriques, Fernando M.A., *Natural hydraulic lime based grouts - The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. s.l.: Construction and Building Materials 26, 2012, pp.135–144, (2012).
- [6] C957-02, ASTM. s.l.: *Standard Test Method for Pulse Velocity Through concrete*, Dec. 2002.
- [7] Cantini, L., et al., *Sonic Tomography applied to Historic Masonry Structures: Validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes*. Edinburgh: Structural Faults & Repair 2012, (2012).
- [8] Miranda, L., et al., *Propagation of elastic waves on stone masonry walls*. s.l.: 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden, (2010).
- [9] Porto, Francesca da, Valluzzi, Maria Rosa e Modena, Claudio, *Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings*. s.l.: International Symposium (NDT-CE 2003), (2003).
- [10] Schuller, M., et al., *Acoustic Tomography for evaluation of unreinforced masonry*. s.l.: Construction and Building Materials, Vol.11, No.3, pp. 199-204, 1997., (1997).
- [11] Valluzzi, Maria Rosa, et al., *Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions*. s.l.: NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th - July 3rd, 2009, (2009).
- [12] Van Rickstal, F., *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*. s.l.: Dissertation. Katholieke Universiteit Leuven; 2000, (2000).
- [13] Van Rickstal, Filip, et al., *Development of mineral grouts for consolidation injection*. s.l.: In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration, 2003, pp. 61-70, (2003).
- [14] Vikan, H., *Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers*. s.l.: s.l.: Doctoral Theses at Norwegian University of Science and Technology, 2005., (2005).
- [15] Zanzi, L., et al., *Sonic Tomography of the stone pillars of a 17th century church*. s.l.: Transactions on the Built Environment vol 55, (2001).